ARAB UNIVERSITY FOR
SCIENCE & TECHNOLOGY
Faculty of Petroleum Industries Engineering



معة العربية الخاصة للعلوم والتكنولوجيا
ة هندسة الصناعات البترولية

Ref:
Date:

م:
يخ:

مقرر موائع الحفر

السنة الرابعة – الفصل الثاني 2024/2023

(المحاضرة الرابعة والخامسة)

مدرس المقرر: د.م. مصطفى المصري

المحاضرة الرابعة و الخامسة

وظائف سوائل الحفر

1-3: تنظيف قعر البئر من نواتج الحفر الصخرية:

يعرف معامل لتنظيف التام لقعر البئر بالإبعاد الفوري والتام للفتاتات الصخرية المحتة من قبل رأس الحفر فور قطعه بحيث أن العناصر الفعالة لرأس الحفر تعمل باستمرار على حت صخور جديدة. في حال عدم وجود تنظيف تام لقعر البئر من نواتج الحفر، سوف يقوم رأس الحفر بإعادة طحن هذه النواتج، وبالتالي فإن جزء من الطاقة يتم هدرها دون مردود.

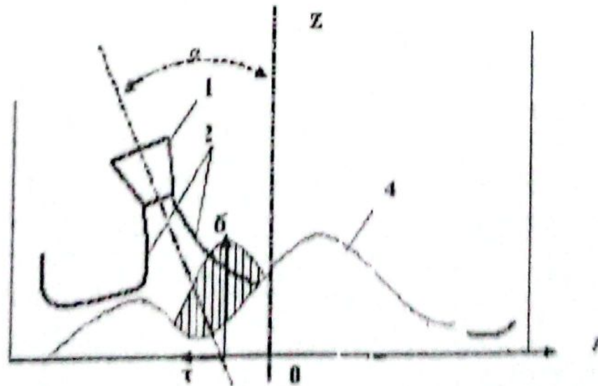
و تلعب العوامل الهيدروليكية (غزارة ضخ سائل الحفر، سرعة خروج السائل من فتحات رأس الحفر) الدور الرئيس في تحديد معامل تنظيف قاع البئر، إضافة إلى خواص سائل الحفر.

1-1-3: تأثير العوامل الهيدروليكية:

عندما يخرج السائل من الفالة يصطدم مع القعر بطاقة عظمى ثم يفقد طاقته تدريجيا. إن مقطع قعر البئر المقابل للفالات ينظف بسهولة، أما بقية مقطع القعر فيتم تنظيفها من خلال حركة السائل على القعر. أي كلما ازدادت سرعة تيار سائل الحفر بعد لحظة التصدم كلما كان التنظيف أفضل.

ويظهر الشكل (3-1) توزع مسارات الاجهادات المماسية و الشاقولية لتيار سائل الحفر على قعر البئر لدى خروجه من فالة محورها يشكل مع محور الدوران زاوية α .

نلاحظ أن الاجهادات المماسية والعمودية غير متساوية بالعلاقة مع نصف قطر البئر r . ومع الدوران يتفاقم عدم التساوي بين هذه الاجهادات، ومهما تغيرت α وبعد الفالة عن القاع فإن مجموع قيم هذه الاجهادات لن تزيد عن ضياع الضغط الكلي في فالات رأس الحفر (*13-16 Mpa*). هذه القيمة أقل بكثير من مقاومة الصخر للانضغاط، بينما يمكن مقارنتها مع متانة الصخر على القص مما يفسر فعاليتها في حت واقتلاع الفتات بسهولة من هيكل الصخر.



الشكل(1-3): توزع مسار الإجهاد المماسي τ (3) ومسار الإجهاد الشاقولي б (4) لقوة التصادم الهيدروليكي لتيار سائل الحفر (2) مع قعر البئر، لدى خروجه من فالة (1) محورها يصنع زاوية α مع محور دوران رأس الحفر (7).

ويعبر عن قوة التصادم بالعلاقة:

$$F_i = \rho_{mud} \times Q \times v_j \qquad (1-3)$$

حيث:

v_j - سرعة خروج تيار سائل الحفر من الفالة. m/s

Q - غزارة ضخ سائل الحفر. m3/s

وقد بينت النتائج الحقلية أن السرعة الميكانيكية للحفر تزداد مع ازدياد قيمة الطاقة الهيدروليكية المنقولة إلى فالات رأس الحفر، ويفسر ذلك بأن ازدياد الطاقة يؤدي لتنظيف أفضل لقاع البئر من نواتج الحفر.

ويعبر عن مقدار الطاقة الهيدروليكية المصروفة في رأس الحفر N_{HB} بالعلاقة:

$$N_{HB} = Q \; P_B \qquad (2-3)$$

حيث، P_B الضغط الضائع في فالات رأس الحفر. Pa

ولفهم أعمق لآلية تنظيف قاع البئر من نواتج الحفر الصخرية نتجه لتحليل القوى المعيقة للتنظيف والقوى المساعدة عليه من خلال تحليل القوى المؤثرة في حبيبة محته من قبل رأس الحفر وموجودة على قعر البئر.

أولا: القوى المعيقة للتنظيف:

1. كتلة الفتاتة Gr .
2. قوة التصاقها مع قاع البئر (المغطى بكعكة الحفر).
3. فارق الضغط بين عمود سائل الحفر والطبقة.

ثانيا: القوى المساعدة على التنظيف:

1. قوة الصدم الجانبي على الحبيبة F1 والناجمة عن تيار سائل الحفر الذي يجري بسرعة V_0 في مستو مواز لقعر البئر.
2. قوة الدفع F2 الناجمة عن فرق سرعتي التيار أسفل وأعلى الحبيبة.
3. قوة احتكاك الحبيبة بتيار سائل الحفر F3 .

ويمكن صياغة مجموعة القوى المساعدة على التنظيف رياضيا، على الشكل التالي:

$$F_1 = A_1 \frac{v_p^2}{2} \rho_{mud}$$

$$F_2 = A_2 \frac{v_p^2}{2} \rho_{mud} \qquad (3\text{-}3)$$

$$F_3 = A_2 \ \tau_p$$

حيث:

v_p – سرعة تيار السائل في مستو مواز للقعر.

τ_p – قوى قص السائل على سطح الحبيبة.

(A_2 , A_1) المقطع الأعظم للحبيبة العمودي على القعر والموازي له على التوالي.

سرعة السائل في مستو مواز للقعر، وذلك بفرض أن تيار السائل الخارج من فتحات رأس الحفر هو عمودي على القعر، تعطى بالعلاقة التالية:

$$v_p = K_1 \frac{\sqrt{Q \ v_j}}{D_{bit}} \qquad (4\text{-}3)$$

ويمكن تقدير قوى القص على قعر البئر بالعلاقة التالية:

$$\tau_p = K_2 \frac{(Q \ v_j)^{7/8}}{D_{bit}^2} \qquad (5\text{-}3)$$

حيث:

K_1, K_2 – ثابتين مرتبطان بتركيب وخواص سائل الحفر.

D_{bit} – قطر رأس الحفر.

من خلال مناقشة العلاقات السابقة يتضح أنه ومن أجل تحسين قدرة سائل الحفر على تنظيف قاع البئر يفترض زيادة كل من الغزارة Q وسرعة خروج سائل الحفر من الفالات v_j، وهما معياران يمكن التحكم بهما إلى القيم التي تضمن تنظيف قاع البئر.

أما إذا تجاوزت سرعة خروج سائل الحفر من الفالات حدود تنظيف القاع, فإنها سوف تؤثر سلباً في سرعة الحفر، بسبب توسع قطر البئر الناجم عن الحل الحتي لتيار سائل الحفر, أو تشكيل تيارات مرتدة تعاكس تيار السائل الأساسي وتعيق حركة الفتاتة وبالتالي تقلل فعالية التنظيف.

و قد أجمعت معظم الدراسات على أن الغزارة التي يجب تحقيقها تتراوح ضمن المجال $0.057.....0.065\ L/s.cm^2$ عند استخدام رؤوس الحفر ذات الدروس المخروطية ، وضمن المجال $0.035....0.050\ L/s.cm^2$ عند استخدام رؤوس الحفر الألماسية.

ومن أجل الاستفادة من تحقيق الفعل النفثي فإن السرعة المقترحة لخروج السائل من فتحات رأس الحفر يجب أن تتراوح في المجال $90.....180\ m/s$.

3-1-2: تأثير خواص سائل الحفر على تنظيف قاع البئر

إن وظيفة سائل الحفر في تنظيف قاع البئر مرتبطة عملياً بمجموعة كبيرة من العوامل الهيدروليكية والميكانيكية والجيولوجية, والتي تؤثر بشكل متزامن يصعب عملية دراستها بشكل متكامل.

لذلك سوف نناقش تأثير بعض هذه العوامل على وظيفة سائل الحفر في تنظيف قاع البئر كالكثافة, واللزوجة وفاقد الرشح.

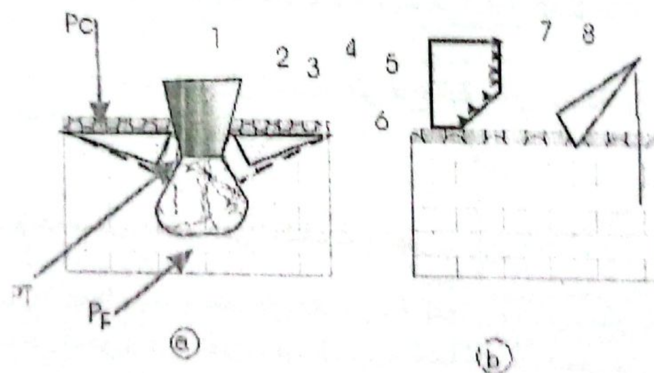
3-1-2-1: تأثير كثافة سائل الحفر على تنظيف قاع البئر

إن تأثير الكثافة يظهر من خلال الضغط الذي يشكله عمود سائل الحفر (P_c) على قعر البئر(العمق H_c) والذي يحدد دائما بالعلاقة التالية:

$$P_c = \rho_{mud}\ g\ H_c$$

وقد لوحظ عملياً أن زيادة كثافة سائل الحفر تؤدي لتقليل سرعة الحفر والناجم عن تأثيره كقوة معيقة للتنظيف. ولتفسير طبيعة هذا التأثير سوف ندرس آلية قطع وانتقال الحبيبة الصخرية على القاع.

في الشكل (3-2) نبين حالتين مميزتين لحالة الحبيبة (عند الحفر برؤوس ذات دروس مخروطية) في لحظة قطع العينة (a) وحركتها على القاع(b):



الشكل(3-2): مخطط توضع الفتاتات على قاع البئر أثناء الحت الحجمي لرأس الحفر (a) والانتقال على قاع البئر (b)

1- سن الدقاق 2- الفتاتة لحظة القطع 3 – شق 4 – جزء الفتاتة الغير مقطوعة
5 – كعكة الحفر, 6-الصخر 7- مسار التيار الموازي للقاع v_p 8- الفتاتة عند حركتها وسط التيار.

إن قطع القتاتة من الصخر (لاحظ الشكل أعلاه) يترافق مع تشكل شقوق حولها، الضغط فيها P_t أقل من ضغط القاع P_c وكذلك أقل من الضغط الطبقي السائد في الصخر P_f.

القوة المعيقة لقطع القتاتة هنا ستنشأ عن فارق الضغط بين البئر P_c والشق، أي المقدار $\Delta P_t = Pc - Pt$. وهذا الفرق في الضغط يساعد قوة التصاق القتاتة مع الصخر.

ومع مرور الزمن ،فإن الضغط حول القتاتة سوف يتعادل ويقلل من قيمة فارق الضغط بين قاع البئر والشق ΔP_t .

وهنا تلعب كعكة الحفر المتشكلة بشكل آني، على قاع البئر، دورا معيقا لدخول سائل الحفر أو رشحه في الشقوق .

بعد تحرر القتاتة من قوة التصاقها مع الصخر تخضع لقوى معيقة للتنظيف (كقوة ثقلها وكذلك قوى احتكاكها مع كعكة الحفر والصخر وأسنان رأس الحفر واصطدامها مع القتاتات الأخرى) إضافة إلى فارق الضغط بين الطبقة والبئر $\Delta P_c = P_c - P_f$ (فارق الضغط التفاضلي)، المرتبط بكثافة سائل الحفر.

إن زيادة الكثافة تزيد من ضغط عمود سائل الحفر P_c وبالتالي زيادة ΔP_c مما يعيق تنظيف قاع البئر، ويقلل من السرعة الميكانيكية للحفر.

كما أن زيادة فارق الضغط التفاضلي ΔP_c ستؤدي لزيادة ΔP_t ، وبالتالي إعاقة قطع القتاتة من قبل أسنان رأس الحفر .

إن انقاص مقدار ΔP_t يتم من خلال تطبيق الإجراءات التكنولوجية المؤدية إلى :

- تقليل كثافة سائل الحفر إلى الحدود المسموحة, وبالتالي تقليل الضغط على قاع البئر P_c لتقليل فارق الضغط التفاضلي ΔP_c
- اختيار سوائل حفر ينتج عنها كعكة ارتشاحية على قاع البئر بأقل سماكة وأعلى نفوذية, وذلك لزيادة سرعة استعادة ضغط الشقوق P_t .

2-2-1-3 -تأثير لزوجة سائل الحفر على تنظيف قاع البئر

من المعروف أن لزوجة سائل الحفر تقل بازدياد سرعة القص, والذي يحقق قيمه العظمى عند خروج السائل من فتحات رأس الحفر، حيث تقترب قيم اللزوجة الفعالة لسائل الحفر من لزوجة الماء.

بيد أن انخفاض اللزوجة الكبير يعتبر عاملاً مهماً في تنظيف قعر البئر، حيث أجمعت الدراسات على أن معامل تنظيف القاع يتحسن مع انخفاض اللزوجة.

ويفسر ذلك وفق نظرية الطبقة الحدية للسوائل المضطربة، حيث أنه عند سرع الجريان الكبيرة جدا يسلك السائل سلوك السوائل النظامية، باستثناء طبقة السائل الواقعة على تماس مع سطح الجريان حيث تتحول فيها السرعة بشكل خطي من الصفر عند السطح إلى قيمة عظمى عند بداية الإضطراب.

سماكة هذه الطبقة عند قعر البئر تعطى بالعلاقة:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\eta_{t}}{\rho_{m}} \cdot \frac{D_{b}}{v_{max}}} \qquad (6\text{-}3)$$

حيث:

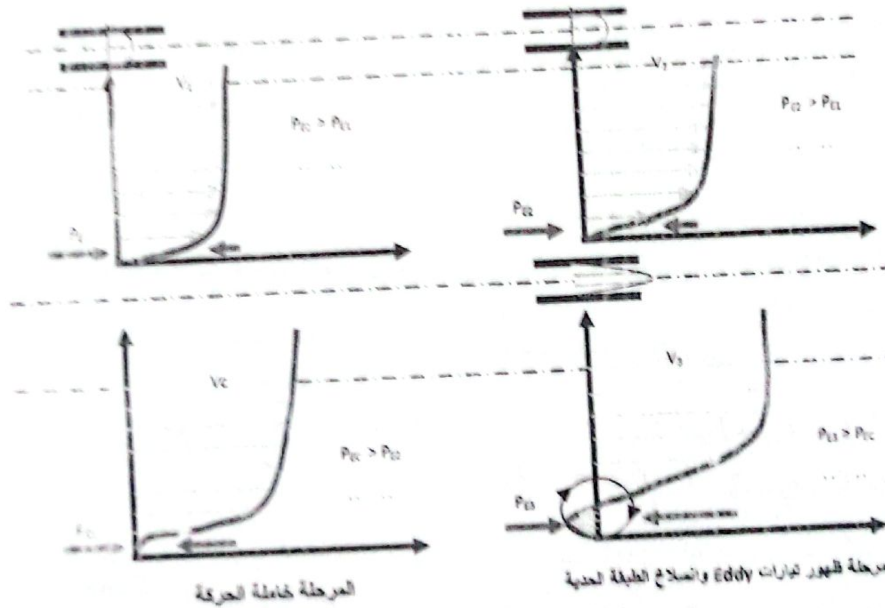
v_{max} – السرعة العظمى في منطقة الاضطراب.

يتضح من العلاقة (3-6) أنه كلما زادت لزوجة سائل الحفر فإن سماكة الطبقة الحدية تزداد وبالتالي فإن الفتاتة ستتعرض لسرعة أقل من v_{max} وبالتالي ستقل فعالية تنظيف قاع البئر.

وضمن نطاق الطبقة الحدية الملاصقة لقعر البئر، والتي ضمنها تظهر المنطقة خاملة الحركة والتي يمكن أن تتطور حتى ظهور تيارات إدي (*Eddy*) والشكل رقم (3-3) يظهر آلية ظهور هذه التيارات.

نلاحظ أنه عند ازدياد سرعة التيار من V_1 إلى V_2 الناجم عن زيادة الضغط في الأنبوب من P_{E1} إلى P_{E2} تزداد باستمرار سماكة الطبقة الحدية، وعند وصول سرعة التيار إلى قيم حرجة V_c تصبح الطبقة الحدية خاملة الحركة تماما (أنظر الشكل 3-3 عند المرحلة خاملة الحركة) وذلك نتيجة تساوي قوى الاحتكاك مع الضغط.

أي أن زيادة السرعة $V_3 > V_C$ إلى قيم تفوق السرعة الحرجة V_c ، الموافقة لقيمة ضغط حرج (P_{EC}) ستؤدي لظهور تيار بطيء معاكس في الاتجاه على مستوي سطح الأنبوب (أو القاع)، يزيد من التأثير السلبي لهذه الظاهرة على تنظيف القاع.



الشكل(3-3) آلية ظهور تيارات إدي (*Eddy*) في مجال الطبقة الحدية خاملة الحركة

إن تبديل كل من اللزوجة و الكثافة يمكن اعتباره عاملاً فعالاً في تنظيف قاع البئر من نواتج الحفر الصخرية.

3-1-2-3- تأثير فاقد رشح سائل الحفر على تنظيف قاع البئر

إن تأثير فاقد رشح سائل الحفر يمكن فهمه من خلال آلية قطع الفتاتة الموضحة على الشكل (3-3) من المخطط (a) حيث أن زيادة فاقد الرشح يزيد من قيمة الضغط في الشقوق P_t ويسرع استعادة الضغط فيها إلى قيمة الضغط الطبقي P_f وبالتالي يقلل من قيمة $\Delta P_t = Pc - Pt$ ، وما ينجم عن ذلك من تسريع عملية قطع الفتاتة .

ويساعد على ذلك أيضا تقليل سماكة كعكة الحفر المتشكلة على قاع البئر وزيادة نفاذيتها، والمؤديين إلى زيادة فاقد الرشح.

كما أن زيادة فاقد الرشح في المنطقة القاعية للبئر يؤدي لتبلل الصخر ويقلل من متانته، ولا سيما تلك الصخور شديدة الحساسية للماء، مسهلا بذلك عملية قطعه من قبل أسنان رأس الحفر.

2-3: وظيفة رفع نواتج الحفر إلى الأجهزة السطحية:

إن رفع نواتج الحفر إلى السطح بعد إبعادها الفوري عن قاع البئر، تشكل الجزء الثاني والمكمل لأهم وظائف سائل الحفر المعروفة حتى الآن.

إن الحبيبات الغضارية أو الرملية الناعمة (ذات الأبعاد الصغيرة $dr\langle\ 0.25mm$) ترفع بسهولة من قبل تيار سائل الحفر الصاعد في الفراغ الحلقي. أما الحبيبات ذات الأبعاد الكبيرة فإن رفعها من قبل تيار سائل الحفر يحتاج إلى تأمين خواص جريانية ونظام جريان مناسبين لنوعية وشكل وأبعاد الحبيبات وكثافتها.

القوى التي تتعرض لها الحبيبة أثناء وجودها في الفراغ الحلقي هي:

- القوة الناتجة عن وزن الحبيبة (المتجهة نحو الأسفل) $F_{G\downarrow}$ وتعاكسها قوة الطفو $F_{A\uparrow}$ محصلة القوتين $R\downarrow$ (تتجه نحو الأسفل انظر الشكل 3-4).

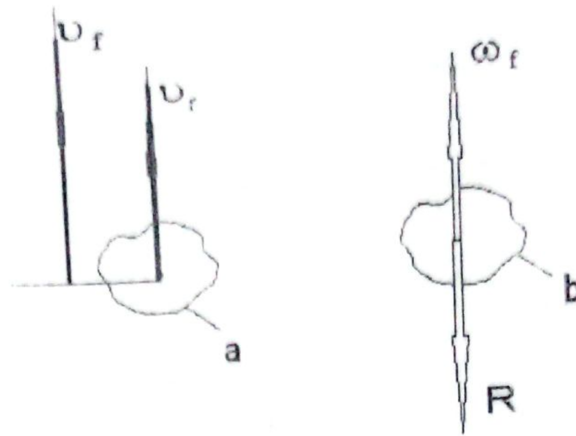
لو فرضنا أن الحبيبة كروية الشكل فإن $R\downarrow$ يمكن أن تحدد بالعلاقة التالية:

$$R = F_G - F_A = v_r\ \ \gamma_r\ -\ v_r\ \ \gamma_{mud} \qquad (7\text{-}3)$$
$$R = v_r\ (\ \rho_r\ -\ \rho_{mud}\ )\ g$$

حيث:

v_r ، γ_r حجم الحبيبة ووزنها النوعي

- القوة الناتجة عن تماس السائل المتحرك باتجاه الأعلى مع سطح الحبيبة (قوة المقاومة) ونرمز لها ω_r (تتجه نحو الأعلى انظر الشكل3-4):



الشكل(3-4) مخطط يمثل القوى المؤثرة على الحبيبة (b)، ومخطط مساري سرعتي تيار سائل الحفر والحبيبة(a)

ولكي نضمن صعود الحبيبة باتجاه الأعلى يجب أن نضمن قوة مقاومة $\omega_{f\uparrow}$ أكبر من القوة التي تنشأ عن وزن الحبيبة وهي طافية R .

لندرس حركة الحبيبة التي تتحرك بسرعة υ_r ضمن تيار سائل الحفر، ولنفرض أن سرعة صعود تيار سائل الحفر في الفراغ الحلقي υ_f.

في الحالة العامة هاتين السرعتين ليستا متساويتين بالنسبة لجدران البئر الساكنة وبما أن كثافة الصخر أكبر من كثافة السائل فإن سرعة السائل ستكون أكبر:

$$\Delta\upsilon = \upsilon_f - \upsilon_r \qquad (8\text{-}3)$$

ننطلق في دراستنا من الحالة التي تكون فيها الحبيبة عائمة في تيار سائل الحفر ($\upsilon_r = 0$)، ولنصطلح على تسمية سرعة تيار سائل الحفر التي عندها تكون الحبيبة عائمة (غير متحركة) **بسرعة العوم** *floating velocity* ونرمز لها للتمييز بالرمز υ_{fr} ، والتي توافق تساوي جميع القوى المؤثرة في الحبيبة $R = \omega_f$.

لتحديد معادلة قوة المقاومة $\omega_{f\uparrow}$ ، عند حركة الحبيبة في سائل متجانس لزج نعتمد على قانون ستوكس حيث أن هذه القوة تابعة لنوع السائل ولرقم رينولدز Re :

$$\omega_f = 3\pi \ \eta \ d_r \ \upsilon_f \qquad (9\text{-}3)$$

حيث:

υ_f- سرعة جريان السائل

العلاقة (3-9) يمكن تطبيقها من أجل قيم Re المنخفضة جدا ($R_e < 1$)

ومن أجل أية قيمة للعدد Re يمكن أن تقدر بالعلاقة التالية:

$$\omega_f = Cw \ \rho_f \frac{\upsilon^2}{2} \ S_r \qquad (10\text{-}3)$$

حيث:

S_r- مساحة أكبر مقطع للحبيبة مواجه لتيار السائل.

Cw. ثابت المقاومة الهيدروليكية، والذي يمكن تحديده حسب مجالات تغير رينولدز كما في الجدول التالي:

الجدول رقم(3-1) : بيان العلاقة $C_W = f(Re)$

R_e	C_W
$Re < 1$	$24/Re$
$1 < Re < 1000$	$\frac{24}{Re}(1+0.17\,Re^{0.685})$
$1000 < Re$	$C_W = 0.44$

بمساواة المعادلتين (3-10) و (3-7) وتعويض $v_r = \frac{\pi . d_r^3}{6}$ وكذلك $S_r = \frac{\pi . d_r^2}{4}$ بقيمهما في المعادلة الناتجة. و بعد الاختصار المناسب نحصل على سرعة العوم:

$$\upsilon_{fr} = \sqrt{\frac{4(\rho_r - \rho_{mud})d_r g}{3\rho_{mud} C_V}} \qquad (11\text{-}3)$$

ويمكن إعادة صياغة هذه المعادلة على الشكل التالي:

$$\upsilon_{fr} = \kappa_r \sqrt{d_r \left(\frac{\rho_r}{\rho_{mud}} - 1\right)} \qquad (12\text{-}3)$$

حيث:

- المقدار $\kappa_r = \sqrt{4g/(3C_W)}$ ثابتة ريتنجر والتي تساوي $\kappa_r = 5.72 M^{\frac{1}{2}}/S$ (من أجل قيم Re > 1000 نجد أن معامل المقاومة الهيدروليكية $C_W = 0.4$).

مثال: احسب سرعة عوم جزيئة صخرية كروية الشكل قطرها **0.01 m** وكثافتها **$2500\ kg/m^3$** لدى وقوعها في سائل كثافته **$1290\ kg/m^3$** ولزوجته **$0.2*10^{-4}$ Pa.s** .

الحل: نطبق العلاقة (3-12):

$$\upsilon_{fr} = 5.72\sqrt{0.01\left(\frac{2500}{1290} - 1\right)} = 0.554 \quad M/S$$

نتحقق من رقم :Re

$$Re = \frac{\rho_{mud}\ \upsilon_{fr}\ d_r}{\eta} = \frac{1290 \times 0.554 \times 0.01}{0.2 \times 10^{-4}} = 30.733 \times 10^4$$

نلاحظ أن هذا الرقم يقع في مجال تطبيق علاقة ريتنجر ($C_W = 0.4$) وفق معطيات الجدول (3-1).

من الواضح أن العلاقات السابقة تنطبق على جريان السوائل المتجانسة اللزجة ولا تنطبق على السوائل

غير المتجانسة البنغامية، والتي تمتاز بوجود توتر ديناميكي للقص، حيث يمكن للحبيبة التي تقع ضمنه أن تطفو حتى عند سرعة التيار (الطفو) المساوية للصفر (حالة التعليق)، وفي هذه الحالة فإن قوى الثقالة المؤثرة على الحبيبة R تكون متوازنة مع قوة القص المحيطة بكامل سطح الحبيبة أي:

$$\omega_f = \pi . d_r^2 . \tau_D \qquad (13\text{-}3)$$

وبمساواة هذه العلاقة مع R من العلاقة (3-7) نحصل على قطر الحبيبات الأعظمي التي تقع ضمن سائل الحفر الحالة توازن ($\upsilon_r = 0$):

$$d_r = \frac{6\tau_D}{(\rho_r - \rho_{mud}) \times g} \qquad (14\text{-}3)$$

حيث: τ_D - *التوتر الديناميكي للقص ،والذي يمكن عملياً اعتباره مساو للتوتر السكوني للقص.*

- في حالة وجود حركة للسائل فإن قوة المقاومة ω_{f1} (الشكل 3-4) ستكون مساوية لمركبتين:

الأولى هي قوة القص المحيطة بكامل سطح الحبيبة و الثانية هي القوة الناتجة عن تماس السائل المتحرك. أي مجموع العلاقتين (3-13) و(3-9):

$$\omega_f = 3\pi \;\; \eta \;\; d_r \;\; \upsilon_f + \pi \;\; d_r^2 \;\; \tau_D \qquad (15\text{-}3)$$

إن سرعة العوم توافق تساوي القوى المؤثرة على الحبيبة $R = \omega_f$ ، أي بمساواة العلاقة (3-15) مع العلاقة (3-7) نحصل على سرعة العوم للسوائل الذنغامية:

$$\upsilon_{fr} = \frac{d_r}{3\eta} \left[\frac{(\rho_r - \rho_{mud}) g d_r}{6} - \tau_D \right] \qquad (16\text{-}3)$$

ويمكن التأكد أنه عند $\tau_D = 0$ فإن العلاقة (3-16) ستصبح هي ذات العلاقة (3-11)، بعد استبدال Cw بقيمته $24/_{Re}$ والموافق لأرقام رينولدز المنخفضة $Re \; \langle \; 1$.

وهكذا من أجل ضمان صعود نواتج الحفر إلى السطح (ضمان سرعة صعود للحبيبات υ_r أكبر من الصفر) ينبغي تحقيق سرعة لتيار سائل الحفر الصاعد في الفراغ الحلقي υ_f (باختيار مناسب للغزارة) أكبر من سرعة العوم . υ_{fr}.

وقد بينت التجارب الحقلية إن وظيفة رفع نواتج الحفر إلى السطح تتحقق بنجاح عندما تصعد نواتج الحفر بسرعة مساوية 20-30 % سرعة عومها في السائل المستخدم، وحتى عند استخدام مختلف أنواع رؤوس الحفر أي:

$$\upsilon_r = 20....30\% \quad \upsilon_{fr} \qquad (17\text{-}3)$$

ومن أجل معطيات المثال السابق، وبتطبيق العلاقة (3-17) سوف نجد أن السرعة التي يجب أن تحققها الحبيبة هي: $\upsilon_r = 0.3 \times 0.552 = 0.1656\, m/s$ ، وبالتالي يجب تأمين سرعة صعود التيار في الفراغ الحلقي عند استخدام هذا السائل تبلغ $\upsilon_f = 0.552 + 0.166 = 0.718\, m/s$.

وبشكل عام إن الغزارة الضرورية لتأمين سرعة تيار معينة في الفراغ الحلقي تحسب من العلاقة:

$$Q = v_f \times A_{an} \qquad (18\text{-}3)$$

حيث: A_{an} - *مقطع الفراغ الحلقي*

العلاقات السابقة تظهر بوضوح كيفية التحكم بوظيفة رفع نواتج الحفر إلى السطح وخصائص سائل الحفر المؤثرة فيها

إلا أنه ولدى تحديد كل من لزوجة وكثافة سائل الحفر يفضل التحكم بهذه الوظيفة عن طريق التحكم بغزارة ضخ سائل الحفر، أو سرعة صعود تيار سائل الحفر في الفراغ الحلقي v_r. وتتراوح قيم v_r التي ينصح باستخدامها حقلياً $1.2 M/_s$ .... 0.45 .

و بشكل عام فإن الغزارة التي تؤمن تنظيف قاع البئر ستكون كافية لرفع نواتج الحفر إلى السطح ، باستثناء حالات سرعة الحفر الكبيرة (المرحلة السطحية)، حيث تكون كمية نواتج الحفر المتشكلة كبيرة (انظر العلاقة3-20).

وفي هذه الحالات , وتلك التي يزداد عندها تركيز نواتج الحفر في الفراغ الحلقي في أية مرحلة من مراحل الحفر، ينصح عادة بإيقاف تقدم رأس الحفر بشكل دوري والاستمرار بضخ سائل الحفر و تدويره في البئر , ويسمح أيضا بإدارة المواسير وهي معلقة على الخطاف للمساعدة في تنظيف الفراغ الحلقي من نواتج الحفر وتحسين قدرته على الرفع نتيجة الإضطراب الذي يتولد نتيجة احتكاك السطح الخارجي لمواسير الحفر مع السائل المحيط به.



مقرر موائع الحفر

السنة الرابعة – الفصل الثاني 2024/2023

(المحاضرة السادسة)

مدرس المقرر: د.م. مصطفى المصري

المحاضرة السادسة

تتمة وظائف سوائل الحفر

3-3: وظيفة المحافظة على استقرار جدران البئر

إن اختراق التشكيلات الجيولوجية بالحفر يؤدي إلى خلخلة التوازن الطبيعي السائد منذ آلاف السنين ونتيجة لذلك تنشأ مجموعة من الاجهادات حول فتحة البئر، في كل طبقة يتم عبورها بالحفر، وتسعى الاجهادات الناتجة لإغلاق فتحة البئر، كي تعيد لهذه التشكيلات استقرارها .

إن إحدى مهام سائل الحفر في البئر هي إعادة التوازن لهذه الاجهادات بشكل مؤقت طيلة فترة الحفر، وريثما يتم تدعيم جدران البئر بالتغليف والسمنتة، حيث يقوم الحجر الإسمنتي بإعادة هذا التوازن بشكل جزئي، على الأقل لفترة كافية لاستثمار البئر.

ينتج عدم استقرار جدران البئر أثناء الحفر عن أسباب متعددة ، بعضها ذا طابع ميكانيكي *Mechanical effects* , ناجم عن ضعف مقاومة الصخور للاجهادات والضغوط المتشكلة حول فتحة البئر، وبعضها الأخر ناجم عن الظواهر الكيميائية *Chemical effects* ، أو الفيزيائية ، أو كلاهما (الظواهر الفيزيوكيميائية) تفرضها العلاقة المتبادلة بين سائل الحفر وبين التشكيلات الصخرية الحساسة للماء (كالغضار والجص والملح.) .

ويؤدي عدم استقرار جدران البئر إلى جملة من التعقيدات (تهدم الطبقات القصفية القاسية، انتفاخ الصخور الغضارية وزحفها باتجاه البئر، انحلال لصخور الملحية ...الخ). والتي ينجم عن معظمها مشاكل كاستعصاء مواسير الحفر وتكرار قشط جدران البئر، وهذا بدوره يعيق استمرار عمليات الحفر، وبالتالي زيادة زمن وتكلفة حفر البئر.

أما الموائع المتواجدة في مسام التشكيلات المخترقة فتتجه نحو الضغط المنخفض، وفي حال كان الضغط في البئر أقل من الضغط المسامي لهذه الموائع، فستندفع من خلال فتحة البئر وقد تصل إلى السطح مسببة مشكلة اندفاع الموائع الطبقية .

3-3-1: الضغط الجيولوجي السكوني(الضغط الجيوستاتيكي):

تتحمل الطبقة المدروسة عند عمق معين وزن جميع الطبقات المترسبة فوقها. ويعبر عن الإجهاد الإجمالي P_G الناتج عن جميع الحمولات (صخر ، ماء...) بالضغط الجيولوجي (أو الجيوستاتيكي) بالعلاقة التالية

$$P_G = \rho_{rt} . g . Z$$

حيث:

ρ_{rt} - *الكثافة الوسطية للترسبات الواقعة فوق الطبقة المدروسة*

Z - *عمق الطبقة المدروسة*

وتتراوح كثافة الصخور في مجالات واسعة وتكون منخفضة على السطح وتزداد مع العمق بسبب الانضغاط والتراص والتحولات الفلزية والكيميائية التي تحدث بوجود الضغط والحرارة في الأعماق.

ويعبر عن الدرج الجيوستاتيكي بالعلاقة:

$$\Delta P_G = \frac{P_G}{Z}$$

2-1-3: الضغط المسامي أو الضغط الطبقي:

إن صخور الرسوبيات تحتوي على فراغات بين حبيباتها *Porosity* أو تشققات ، والتي في معظم الحالات تكون مملوءة بالماء أو النفط أو الغاز, وتنوء هذه الصخور مع المائع الموجود في مساماتها بحمل وزن الطبقات الفوقية، والتي بمجموعها تشكل الضغط الجيوستاتيكي P_G المشار إليه بالعلاقة السابقة، أي:

$$P_G = \sigma + P_f$$

حيث:

σ - الإجهاد الحبيبي الصخري الداخلي

P_f - الضغط الطبقي أو الضغط المسامي

ويقدر الضغط الطبقي P_f في نقطة ما تقع على عمق Z بالضغط الناتج عن وزن هذا العمود ، ويعبر عنه بالعلاقة التالية:

$$P_f = \rho_f \ .g.Z$$

حيث ρ_f *كثافة السائل في المسامات الصخرية*

وتتراوح قيمة الضغط الطبقي في مجالات واسعة ،ويعتبر الضغط الطبقي السكوني (أو لمسامي) عادياً أو طبيعياً إذا نجم عن وزن عمود المياه الطبقية المالحة ذات، الكثافة $\rho_f = 1050....1080kg/m^3$

وفي حال ارتفاع الضغط الطبقي إلى قيم لا يمكن وصفها كوزن عمود من المياه الطبقية يسمى الضغط الطبقي غير العادي (أو الضغط الطبقي الشاذ ارتفاعا أو هبوطا) .

تنشأ الضغوط غير العادية عندما لا تتمكن السوائل المفصولة نتيجة انضغاط الرسوبيات أو المتولدة ضمنها من الصعود الحر إلى التشكيلات التي يكون فيها الضغط عادياً, أو الصعود إلى السطح .

وتصادف **ظاهرة الضغط الشاذ صعوداً** (على سبيل المثال) في الحالتين التاليتين:

أولا: تنشأ في الطبقات الغضارية السميكة عندما تكون على تماس مع طبقة رملية, و بسبب انخفاض نفاذية الغضار بالمقارنة مع نفاذية الرمل على نفس العمق (نفاذية الغضار تبلغ 2×10^{-6} *mD* على عمق *2600m* ما الرمل على ذات العمق نفاذيته *1000 mD*) .

وحيث تعطي الطبقة الرملية طريقاً نفوذاً للمائع المسامي باتجاه السطح, يشكل الغضار على حدود التماس مع الرمل كعكة ارتشاحية شبه كتيمة لا تسمح للمائع بالارتشاح بنفس معدل المائع الناتج عن التراص الجيولوجي ، مما يفسر زيادة الضغط المسامي إلى قيم فوق عادية مستمدة أساسا من الاجهادات الجيولوجية.

ثانيا : تنشأ عند تحول تشكيلات الغضار المونتموريلينيتي إلى غضار إيليتي عند أعماق تصل إلى(*3000-4000 m*) وبوجود حرارة مناسبة للتحول .

ينتج عن هذا التحول كميات كبيرة من المياه التي كانت في حالة تبلور في فلز المونتموريلينيت ، ويؤدي انحصار هذه المياه ضمن تشكيلات الايليت الغضارية إلى نشوء ضغوط طبقية وجيولوجية شاذة ارتفاعا (فوق عادية) .

أما **الضغوط الطبقية المنخفضة (الشاذة هبوطاً)** فتنجم مثلا , عن استهلاك المياه ضمن مسامات

التشكيلات المحصورة ضمن طبقات كتيمة, حيث تتحول المياه الحرة إلى متبلورة أو مترابطة, أقل حجماً من المياه الحرة، وينجم عن ذلك انخفاض محلي في الضغط يصعب تعويضه بسرعة كافية بالاتصال الهيدروليكي مع الطبقات المجاورة، إلا بعد مرور زمن جيولوجي كاف لحدوث ذلك.

3-3-2: الضغط السكوني في البئر :

يتم اختيار كثافة سائل الحفر الذي يجب أن يملأ فتحة البئر بحيث تكون قيمة الضغط السكوني الناتج عن وزن هذا العمود مساوياً على الأقل لقيمة الضغط الطبقي، وأن لا يتجاوز قيمة الاجهادات التي تؤدي إلى تمزق الصخر المحيط بجدران البئر.

مقدار تدرج ضغط السائل داخل البئر فتعطى بالعلاقة:

$$\Delta P_c = \frac{P_c}{h} = \frac{\rho_{mud} \times g \times h}{h} = \rho_{mud} \times g$$

وتحدد قيمة كثافة سائل الحفر بحيث تتحقق المتراجحة التالية طيلة فترة الحفر:

$$P_f \leq P_c < P_{fr}$$

حيث: P_{fr} - قيمة الضغط المؤدية لتشقق الصخر المحيط بفتحة البئر.

إن انخفاض قيمة الضغط السكوني في البئر عن قيمة الضغط الطبقي ستؤدي إلى نشوء فارق في الضغط بين الطبقة النفوذة والبئر, يتحرك بتأثيره المائع الطبقي باتجاه البئر , وينجم عن ذلك دخول المائع الطبقي إلى سائل الحفر مقللاً من قيمة تدرج الضغط السكوني ،وقد يؤدي إلى مشكلة اندفاع المائع الطبقي.

كما أن زيادة الضغط السكوني في البئر عن قيمة الاجهادات الأفقية للصخور المحيطة بفتحة البئر ستؤدي إلى تمزق الصخر إن تجاوزت حد المرونة لبعض الصخور وتسرب سائل الحفر (مشكلة التهريب).

وبشكل عام تختار كثافة سائل الحفر بحيث يكون الضغط السكوني في البئر أكبر من الضغط الطبقي بـ *10...15 at*.

وعندما تكون ثبوتية جدران البئر جيدة، و قيم الاجهادات القطرية حول فتحة البئر دون القيم الحرجة لمرونة الصخر ,يمكننا استعمال الهواء كمائع حفر بدلا من السوائل العادية، وتحقيق سرعة حفر عالية.

وهكذا فإن سائل الحفر يقوم بوظيفة تحقيق ضغط معاكس على جدران البئر لمنع تهدم الصخور أثناء الحفر، وبنفس الوقت، يقوم بمنع الموائع الطبقية المتواجدة ضمن مسامات هذه الصخور من الدخول إلى حفرة البئر، والتي يمكن أن تسبب مشكلة الإندفاع .

3-4: وظيفة تعليق نواتج الحفر أثناء التوقف عن الدوران

إن هذه الوظيفة مرتبطة بخاصية التخثر (*gelation*) (هو قدرة بعض السوائل في التحول باتجاهين، تشكيل تركيب مقاوم عند تركها بحالة سكون والعودة إلى حالتها الأولية عند معاودة الحركة) .

إن تميز سوائل الحفر بهذه الخاصة تجعلها تؤدي وظيفة تعليق الطور الصلب في الفراغ الحلقي عند التوقف عن دوران سائل الحفر ومنعها من الهبوط إلى قاع البئر.

إن هبوط نواتج الحفر إلى قاع البئر عند التوقف، يمكن أن يتسبب بالمعوقات التالية لعملية الحفر:

1. تجمع نواتج الحفر فوق رأس الحفر والعمل على أسفنة رأس الحفر وأعمدة الحفر مع جدران البئر، وتؤدي إلى مشكلة استعصاء مجموعة مواسير الحفر.

2. إعادة طحن النواتج المتجمعة على القاع واستهلاك اضافي لرأس الحفر و زمن حفر البئر، ينعكس على كلفة البئر الإجمالية.

3. تجمع نواتج الحفر في الجزء السفلي يؤدي إلى تباين كثافة سائل الحفر في الفراغ الحلقي، والذي قد يؤثر في استقرار بعض الطبقات المكونة لجدران البئر، واحتمال حدوث اندفاع الموائع الطبقية.

يقوم سائل الحفر أيضا بوظيفة تعليق نواتج الحفر عند التوقف عن الدوران لدى استخدام تلك السوائل، التي تمتاز بنيتها بالميزة الآتية:

تزداد لزوجتها أثناء التوقف عن الحركة إلى الحد الذي يمكن السائل من حمل نواتج الحفر ضمن بنيته، والعودة إلى لزوجتها العادية عند متابعة الحركة (الضخ).

تمتاز بهذه الخاصية سوائل الحفر الحديثة ذات التركيز القليل بالطور الصلب والمعالجة بالبوليميرات العضوية أو المعدنية، والتي تكون لزوجتها تتناسب عكسا مع تدرج سرعة القص.

بيد أنه من الممكن التحكم بقوة وسرعة نمو هلام سائل الحفر، بحيث تنمو إلى قيم كافية لتعليق نواتج الحفر فقط، دون أن تصل إلى قيم كبيرة تجعل من الصعب على المضخات تأمين الضغط اللازم لمعاودة الدوران، أو إحداث تشقيق هيدروليكي للطبقات الضعيفة، نتيجة الحاجة لرفع ضغط الضخ إلى قيم حدية كبيرة، لتغلب على التوتر السكوني للقص لهذا السائل .

هذا المطلب تحققه العلاقة:

$$P_c + P_{pump} \leq P_{fr}$$

$$P_c + \frac{4\ h}{D_{bit} - d_{ep}}\theta_t \leq P_{fr}$$

حيث:

P_{pump} - ضغط الحقن الضروري لإعادة تدوير سائل الحفر بعد توقفه لزمن t

d_e - القطر الخارجي لمواسير الحفر,

θ_t - التوتر السكوني للقص بعد مرور زمن ,

P_{FR} - ضغط تشقق الصخور.

ومن العلاقة المذكورة يمكن تحديد قيمة θ_t الأعظمية، والتي لا تسبب تشقيق الصخر بعد التوقف لفترة زمنية t واللازمة لمعاودة الضخ .

$$\theta_t \leq \frac{P_{fr} - P_c}{4h} \times (D_{bit} - d_{ep})$$

وفي حال نمو θ_t إلى قيم لا تسمح بها العلاقة المستخدمة, يحدد الزمن الذي تصل خلاله إلى القيم الحرجة ويمنع التوقف بعد هذا الزمن.

وفي حال استحالة تحقيق هذا الشرط فمن الأفضل إيجاد المواد الكيميائية أو الإضافة اللازمة لسائل الحفر لتخفيض التوتر السكوني للقص إلى القيم المسموحة.

إن بعض الدراسات قد أظهرت قيوداً أكثر على تطوير خاصية الهلام الضرورية كي يقوم سائل الحفر بوظيفة تعليق مخلفات الحفر الصخرية.

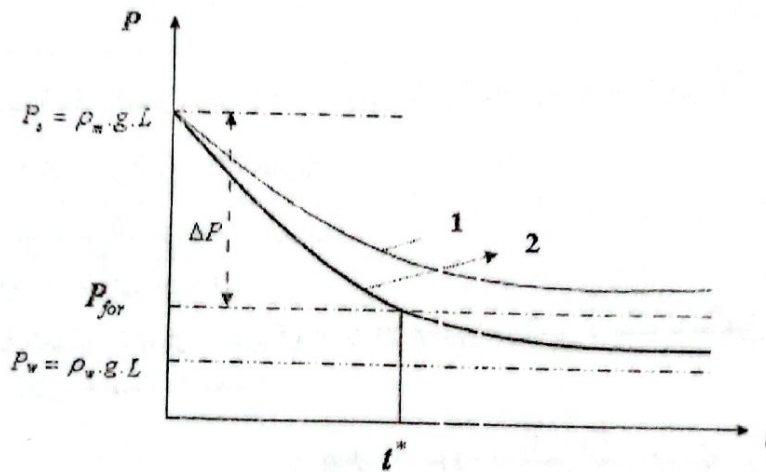
عند توقف سائل الحفر عن
هذه القيود مرتبطة بظاهرة هبوط الضغط السكوني لعمود سائل الحفر المتخثر. عند توقف سائل الحفر عن الدوران (في حالة سكون)، إلى قيم أقل من الضغط الطبقي , الأمر الذي يؤثر على وظيفة سائل الحفر في منع تدفق الموائع الطبقية عند التوقف عن الدوران.

وعلى الشكل (1) نمثل بيانيا حركية انخفاض الضغط لنوعين متمايزين من سوائل الحفر:

النوع الأول : نلاحظ أنه ولدى انخفاض الضغط السكوني لسائل الحفر المحسوب وفق العلاقة ($P_s = \rho_m . g . L$). يقارب الضغط السكوني لعمود الماء المستخدم في تحضيره والذي يعبر عنه بالعلاقة ($P_s = \rho_w . g . L$) . أي سوف يصل إلى قيمة أدنى من الضغط الطبقي P_{for} بعد مرور زمن (t^*) .

أي يمكن اعتبار ($t = t^*$)، هو الفترة الزمنية من لحظة التوقف عن الدوران، والتي خلالها سيهبط الضغط الهيدروستاتيكي لسائل الحفر إلى قيمة مساوية للضغط الطبقي ، والتي بعدها يبدأ تدفق الموائع الطبقية إلى البئر . وفي هذه الحالة يبرز خلل وظيفي في أداء هذا النوع من السوائل يمنع استعمالها غير المشروط أو المقيد بزمن التوقف عن الحركة $t_{st} \leq t^*$ وهذا الخلل ناجم عن تغير إشارة ΔP إلى السالب .

النوع الثاني: يظهر أن انخفاض الضغط السكوني لسائل الحفر يكون بطيئاً , ولا يصل إلى الضغط السكوني لعمود الماء المستخدم في تحضيره, في هذه الحالة يبقى الضغط في البئر P_s أكبر من الضغط الطبقي P_{for} .



الشكل (1) هبوط الضغط السكوني لسوائل الحفر أثناء التوقف عن الدوران

5-3: تبريد وتزييت عناصر رأس الحفر ومجموعة المواسير:

من المعروف أن درجة الحرارة تزداد مع ازدياد عمق البئر، وذلك بعد تجاوز القشرة السطحية. ومع ازدياد أعماق الحفر تزداد أهمية الدور الذي يؤديه سائل الحفر عند دورانه في البئر حيث يقوم بالتبادل الحراري مع أجهزة ومعدات الحفر في جميع عناصر دورته.

الطبقة السطحية للقشرة الارضية تستمد حرارتها من اشعة الشمس فلذلك تنخفض درجة الحرارة في هذه الطبقة مع العمق حتى تثبت في نهاية هذه الطبقة التي لا تتجاوز سماكتها (30 – 50 متر). تسمى درجة الحرارة في نهاية هذه الطبقة بدرجة الحرارة للطبة السطحية (Ts).

... الطبقة تبدأ درجة الحرارة بالتزايد مع العمق, حيث يكون مصدر الحرارة هو باطن الارض.
... درجة الحرارة على عمق معين بالعلاقة التالية:

$$T_h = T_s + b\,H$$

معدل التدرج الحراري (b) يساوي (3-5 دجات لكل 100 متر).

- لحساب درجة حرارة سائل الحفر داخل البئر, نعتبر درجة حرارة سائل الحفر ثابتة من قاع البئر حتى ارتفاع يساوي ثلث عمق البئر, وتعطى بالعلاقة التالية:

$$T_{mud} = 0.33\,T_s + 0.67\,T_{bottom}$$

- أما في الثلث العلوي من البئر تحسب درجة حرارة سائل الحفر بالعلاقة التالية:

$$T_{mud} = 0.67\,T_s + 0.33\,T_{bottom}$$

حيث (T_{bottom}) هي درجة حرارة القاع.

ونستخدم العلاقة التالية لتقدير درجة الحرارة الوسطية في الثلث الثاني في البئر:

$$T_{mud} = 0.5\;T_s + 0.5\;T_{bottom}$$

يستفاد من هذه العلاقات في تقييم مجال عمل المواد المضافة إلى سائل الحفر.

يقوم سائل الحفر بامتصاص الحرارة الناتجة عن احتكاك مجموعة مواسير الحفر مع جدران البئر وكذلك الحرارة الناتجة عن احتكاك تروس رأس الحفر مع مساندها ومع صخور القاع. و عند خروج سائل الحفر إلى التجهيزات السطحية يبرد جزئيا ثم يعاد ضخه ليقوم بالتبادل الحراري من جديد. المبادلة الحرارية لرأس الحفر والمواسير يزيد من مردودها وعمرها الاستثماري.

ومن اجل التقليل من احتكاك مجموعة مواسير الحفر مع جدران البئر، وكذلك تروس رأس الحفر مع مساندها ومع الصخر وأيضا تقليل الحرارة الناجمة عن الاحتكاك، يضاف إلى سائل الحفر مواد تزييتية كالنفط والفحم المسحوق ومواد مخصصة لذلك ، بهدف تحويل احتكاك معدن- صخر إلى احتكاك معدن سائل – صخر سائل .

6-3: تلبيس وتحييد جدران البئر:

إن سائل الحفر يشكل على جدران البئر النفوذة كعكة الحفر التي تمتاز بنفاذية ضعيفة ومقاومة ميكانيكية عالية تساهم في تدعيم جدران البئر من خلال:

أولا: تقليل معدل الإرتشاح وبالتالي الحد من التأثير السلبي للراشح المائي على ثبوتية جدران البئر، وخاصة، المكونة من صخور حساسة للماء (كالغضار والمارن والجص)

ثانياً: تغليف جدران البئر النفوذة بطبقة ذات متانة كافية تقاوم احتكاك مواسير الحفر بجدران البئر وقابلة-في حال التلف- إلى ترميم نفسها، وتحد بذلك من توسع وتكهف جدران البئر

ويمكن التحكم بتركيب سائل الحفر بحيث يعطي كعكة الحفر الرقيقة والمتينة والكثيفة، والتي تلبي جميع متطلبات الحفر، وذلك بإجراء الدراسة المخبرية المناسبة.

وعلى جدران البئر غير النفوذة ،وكذلك مواسير وأعمدة الحفر والوصلات وتجهيزات مجموعة مواسير الحفر فإن سائل الحفر يقوم بتشكيل غشاء طيني، كغلاف واقٍ يقوم بحماية جدران البئر من تأثير سائل

الحفر (تحديد جدران البئر)، حيث يحد من انتفاخ لطبقات الغضارية والشيل والجص وهجومها باتجاه البئر من جهة، ويقوم بحماية مواسير ومعدات الحفر من جهة أخرى.